

文章编号: 0253-2239(2010)04-0954-05

普通单模光纤的长距离双参量传感 布里渊光时域反射计

宋牟平 裘超

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 对于普通单模光纤的自发布里渊散射光,其频移和光功率都是温度和应变的函数,因此检测散射光信号的布里渊频移和光功率,即可同时得到沿光纤一维分布的温度和应变。采用光相干检测的布里渊光时域反射计适合于长距离分布式传感,但存在检测信号的偏振相关性和幅度解调问题。采用偏振分集接收和小波分析对传感信号进行处理,同时得到了布里渊散射光的频移和功率,从而实现了 25 km 普通单模光纤的分布式双参量传感。

关键词 传感器;分布式光纤传感;布里渊光时域反射计;双参量;长距离

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0954

Long-Distance Brillouin Optical Time Domain Reflectometer with Two-Parameter Sensing for Standard Single-Mode Optical Fiber

Song Muping Qiu Chao

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract For the normal single-mode optical-fiber, the frequency shift and optical power of Brillouin scattering light are the functions of the temperature and strain. So, the temperature and strain of the optical-fiber can be obtained together, when Brillouin frequency shift and the optical power are able to be detected simultaneously. Brillouin optical time domain reflectometer with coherent detecting is suitable for long-distance distributed sensing, but there exist two critical problems. One is the polarization relative detecting signal; the other is how to demodulate the wideband photoelectric signal. The orthogonal polarization diversity reception and real-time wavelet transform are adopted to deal with these problems, in order to get the frequency and power of the scattering light at the same time. The experimental procedures and results are presented in the text. A laboratorial system of 25 km distributed Brillouin optical time domain reflectometer is achieved for two-parameter sensing.

Key words sensors; distributed optic-fiber sensing; Brillouin optical time domain reflectometer; two-parameter; long distance

1 引 言

光纤传感器具有抗电磁干扰、电绝缘性好和耐腐蚀等诸多优点^[1,2]。分布式光纤传感器(DOFS)^[3~6]可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息,具有独特的应用前景。其中布里渊散射 DOFS^[7~9]分析传感光纤的布里渊散射光的频移或功率,可得到沿光纤分布的温度和/(或)应变。相对于拉曼散射分布式光纤传感器^[3,4],布里渊散射光信号受到的衰减和色散较小,且其对温度和应变都

敏感,使得布里渊散射 DOFS 适合于长距离(大于 20 km)分布式传感。虽然国外 Ando, Sensornet, OZoptics 等公司已有布里渊散射 DOFS,但仍在研究新技术以实现更广泛的应用;国内受技术和器件的限制,目前仍在研究布里渊散射 DOFS 相关的关键技术。常见的长距离布里渊散射 DOFS 有布里渊光时域分析(BOTDA)^[7]和布里渊光时域反射计(BOTDR)^[8,9]两种结构。BOTDR 结构的布里渊散射 DOFS 只对一端传感光纤进行光信号处理,具有较好

收稿日期: 2009-01-20; 收到修改稿日期: 2009-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

作者简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感技术、光子器件及应用等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

的应用场合。但 BOTDR 接收的是自发光布里渊散射光,光功率较弱,且和瑞利散射光的频谱间隔只有 11 GHz 左右,需要合适的光检测技术。光相干检测技术^[8,9]可以同时完成放大接收信号和提取布里渊散射光信号,是一较好的解决方法。

光纤的布里渊散射光频移和功率都随温度和应变而改变^[10,11],如能一起得到传感光纤的各处布里渊频移和光功率,就能同时检测出温度和应变。但由于光在普通单模光纤中传输时产生的“随机”偏振态变化,光相干检测时存在接收信号偏振相关性^[12],以及宽带幅度解调^[13]问题,难以得到好的布里渊散射光功率信号。虽然国外已采用单偏振等特殊光纤来消除偏振相关性,但在传感光纤的成本上将大幅度增加,且难以应用于已铺设好的普通光缆。这里采用偏振分集接收^[12]来解决接收信号偏振相关性问题,并采用 Morlet 小波分析^[14]来进行宽带检测信号的幅度解调。实现了 25 km 普通单模光纤的分布式双参量传感。当只探测布里渊光频移,即进行单参量检测时,传感器的温度和应变分辨率分别为 3 °C 和 40 $\mu\epsilon$;当同时探测布里渊光频移和功率,即进行双参量检测时,传感器的温度和应变分辨率分别为 15 °C 和 200 $\mu\epsilon$ 。

2 传感原理和系统

在普通石英单模光纤中,一方面自发布里渊散射光的频移与光纤的有效折射率和超声声速有关。而温度和应力都能改变光纤的折射率和超声声速,所以只要检测光纤中布里渊频移的变化,就可能得到温度或应力在光纤上的分布。另一方面,光纤中布里渊散射光功率与光纤所处环境温度和所承受的应变在一定条件下呈线性变化关系。而且温度和应变分别对布里渊散射光频移和光功率的影响是不同的,普通单模光纤中布里渊散射光的频移 $\Delta\nu_B$ 和功率变化 ΔP_B 是温度 T 和应变 ϵ 的函数,有如下关系^[10,11]

$$\Delta\nu_B = C_{\epsilon} \Delta\epsilon + C_{vT} \Delta T, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_B}{P_B(\epsilon, t)} = C_{P\epsilon} \Delta\epsilon + C_{PT} \Delta T, \quad (2)$$

式中

$$C_{\epsilon} = 0.0483 \pm 0.0004 \text{ MHz}/\mu\epsilon,$$

$$C_{vT} = 1.10 \pm 0.02 \text{ MHz}/\text{K},$$

$$C_{P\epsilon} = -9.0 \times 10^{-4} \%/\mu\epsilon,$$

$$C_{PT} = 0.32 \%/\text{K}.$$

由(1)和(2)式经变换得到

$$\Delta\epsilon = \left(\frac{C_{vT} \Delta P_B}{P_B} - C_{PT} \Delta T \right) / (C_{vT} C_{P\epsilon} - C_{PT} C_{\epsilon}), \quad (3)$$

$$\Delta T = \left(C_{P\epsilon} \Delta\nu_B - \frac{C_{\epsilon} \Delta P_B}{P_B} \right) / (C_{vT} C_{P\epsilon} - C_{PT} C_{\epsilon}). \quad (4)$$

因此,如能同时得到传感光纤的布里渊散射光的频移和功率,则能实现温度和应变的双参量传感。在实际检测中,由于布里渊光频移的敏感性大于光功率^[10,11],当进行单参量传感时,一般采用检测布里渊光频移;而双参量传感时,由于较低的光功率敏感性的影响,其传感精度会低于单参量传感。

图 1 是用来实现长距离双参量传感的 BOTDR 系统实验图。1.55 μm DFB 激光器(线宽小于 1 MHz)为光源,经耦合器分为两路光。一路光作为激励光,被调制成光脉冲(脉冲宽度为 50 ns,由光时域反射计的原理可知距离分辨率为 5 m),由光放大器 EDFA 放大(光脉冲峰值功率为 26 dBm),经耦合器注入 25 km 普通单模光纤;另一路光作为参考光,由 10 GHz 电光调制器调制成频移光^[5](频移可调,以实现完整布里渊频谱的检测),并采用 FIBERPRO 公司的电动偏振控制器(型号:PC1300,响应速度为毫秒量级)进行光偏振控制^[12]。激励光在传感光纤中产生后向自发布里渊散射光,与频移参考光进行相干检测得到光电信号^[9],经混频、滤波(带宽为 20 MHz)和 80 MHz 的模数转换后,采用基于 Morlet 小波变换^[14]的数字信号处理,再由数字累加平均器(BOXCAR)进行信号平均,得到信噪比改善的布里渊散射信号,从中计算得到布里渊光频移和功率,最后根据(3)式和(4)式计算得到双参量传感信息。

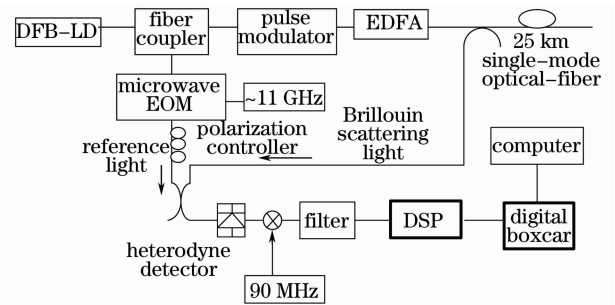


图 1 长距离双参量传感的 BOTDR 实验系统

Fig. 1 Experimental arrangements of long-distance BOTDR with the capability of two-parameter sensing

在图 1 的传感系统中,基本的传感原理和以前的系统^[9]相类似。但为了实现双参量传感,需要同时得到布里渊频移和光功率信息。但相干检测 BOTDR 存在接收信号的偏振相关性,使得频移和幅度信息难以提取,特别是散射光功率对应的光电检测信号幅度会产生明显的偏振相关波动,如图 2(a)所示。这会造

成双参量传感失效。这里采用正交偏振分集接收^[8]来抑制此偏振相关性,如图 2(b)所示,偏振相关的信

号波动得到有效的抑制,这使得布里渊散射光功率的提取成为可能。

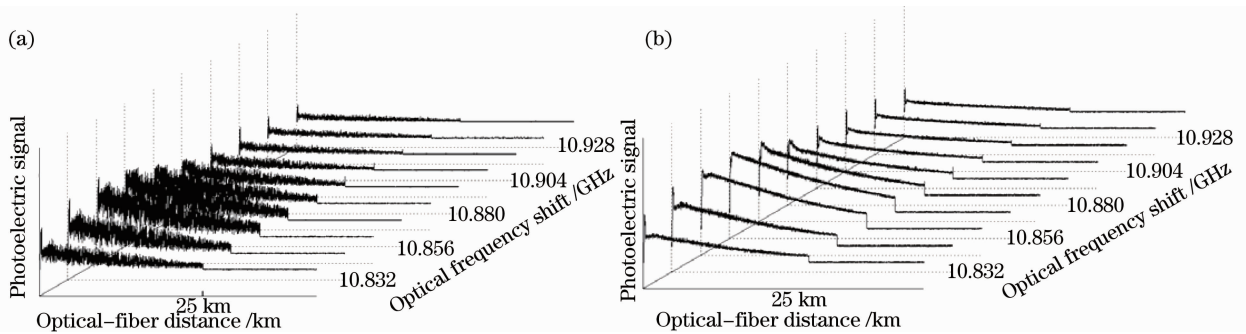


图 2 传感光纤各处的布里渊散射光谱。(a)未采用正交偏振分集接收;(b)采用正交偏振分集接收
Fig. 2 Panorama of the Brillouin scattering signal. (a) without the optical polarization controller;
(b) with the optical polarization controller

图 2(b)所示的布里渊散射光信号还存在残余的偏振相关干扰,因为这里使用的光纤偏振控制器的响应速率只达到几十毫秒量级,难以实现理想的动态偏振控制(需要对每个光纤采样段的偏振进行控制)。如使用响应速率达到光脉冲时间尺度的偏振控制器,预计可消除残余的偏振相关的影响。但国内没有这样高速的偏振控制器,因而造成实验结果不可能达到理想程度。

另外,相干检测 BOTDR 的光电检测信号是宽带幅度调制信号^[13],如不采用数字信号处理,则检测得到的信号幅度和信噪比都会降低,这会对频移和光功率的同时提取造成困难。这里采用基于 Morlet 小波变换^[14]的数字信号处理对 BOTDR 的光电检测信号进行处理,如图 3 所示,可以得到比没有采用 DSP 的幅度和信噪比大 1 倍,因此降低了对频移和光功率进行同时提取的难度,为实现双参量传感创造了条件。

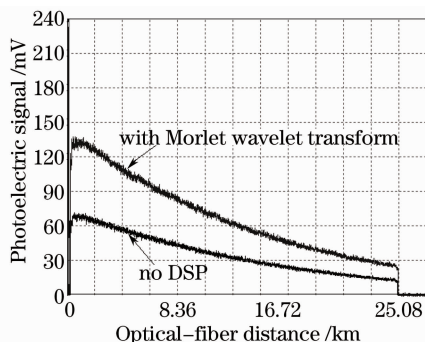


图 3 没有 DSP 处理和经过 Morlet 小波变换处理的布里渊散射光电检测信号对比

Fig. 3 Comparison of the Brillouin scattering signals between no DSP and processed by Morlet wavelet transform

3 实验结果

图 4 是 BOTDR 进行温度和应力双参量测试的实验系统。25 km 普通单模光纤的大部分卷在标准的光纤环里,处于常温中,但在接近尾部的三段光纤进行如下操作:第 1 段 10 m 长光纤放在一热水杯里,有一温度计进行实际温度测试;第 2 段光纤处于常温,也不受附加的应变;第 3 段 10 m 光纤段绕在两个滑轮之间,并进行拉伸,产生所需的应变,另外滑轮 2 和导轨之间有千分尺刻度,可读出光纤拉伸值,从而得到实际光纤应变,和传感应变进行比较。图 5 是室温约为 20 °C,第 1 段光纤处于 75 °C,第 3 段光纤受到 800 $\mu\epsilon$ 应变下得到的布里渊频移和幅度信息,累加平均次数为 16000 次。可看出,温度的变化会使得布里渊散射光的频移和光功率都产生较明显的改变;而应变的变化会产生明显的频移变动,但对光电信号幅度对应的光功率只产生较小的变化。因此温度和应变对频移和幅度的影响是不同的,可以应用(3)式和(4)式进行双参量传感。

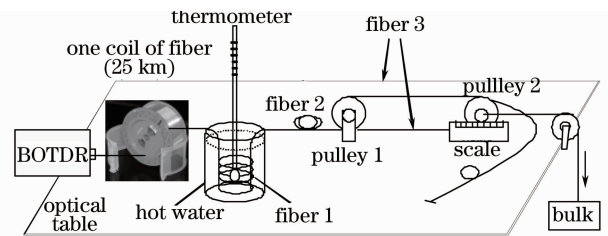


图 4 BOTDR 的温度和应力双参量测试实验系统

Fig. 4 Two-parameter detecting experimental system of BOTDR for temperature and strain

比较图 5 的频移和功率(光电信号幅度)变化曲线可看出,相对于各自的变化量,频移变化的信噪比较大,而光电流信号幅度变化的信噪比较差。这是上述的残余偏振相关性引起的,由于其对各个频移

下的散射光信号都有相似的影响,因此造成光功率信息的提取影响较大,而频移信息的提取没受到大影响。另外,整体信号的信噪比还取决于如何减少系统噪声(包括暗电流噪声、热电阻噪声等),可通过增加 BOXCAR 的累加次数减少系统噪声的影响,从

而改善传感信号和测量精度。但增加累加处理时间(这里一次测量时间为 40 s),容易造成在一次测量过程中,由于传感量发生变化引起的布里渊频移和功率变化,形成测量错误,从而使传感器丧失实用性。

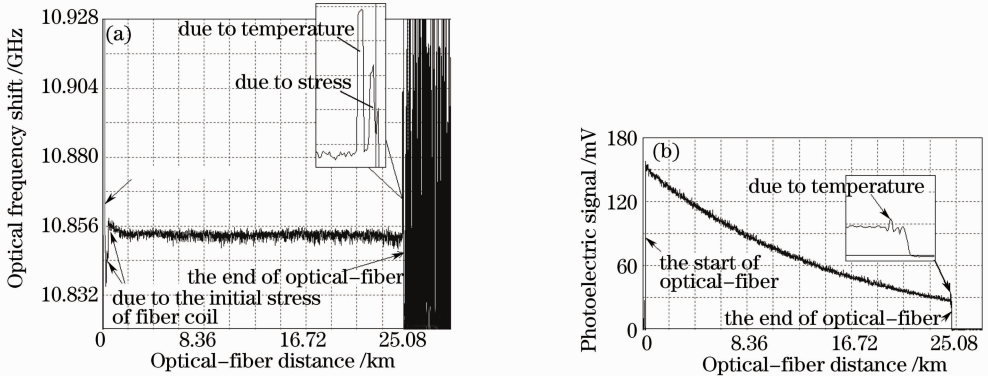


图 5 分析散射光电检测信号得到的布里渊频移(a)和幅度(b)曲线

Fig. 5 Brillouin frequency shift (a) and amplitude (b) of sensing fiber with analyzing the scattering photoelectric signal

按照(3)式和(4)式,分析图 5 的频移和幅度曲线,得到了图 6 的温度和应变双参量传感曲线,其中的小图是对温度或应变变化处的放大。可以看出双参量传感时,温度分辨率约为 15 °C,应变分辨率约为 200 $\mu\epsilon$,这大幅度地低于单独利用频移测试温度或应变时达到的性能。原因就是前面提到的:由于受限于偏振控制器的速率(毫秒量级),即偏振控制

器跟不上电脑发出的电信号变化,在变换过程中未能达到正交偏振控制所需的状态,检测信号还有残余的偏振相关性,其表现为幅度信号的信噪比;而且布里渊散射光的功率敏感性较低。因此增加累加平均次数可在一定程度上改善性能,但性能的提高主要取决于如何抑制信号偏振相关性。

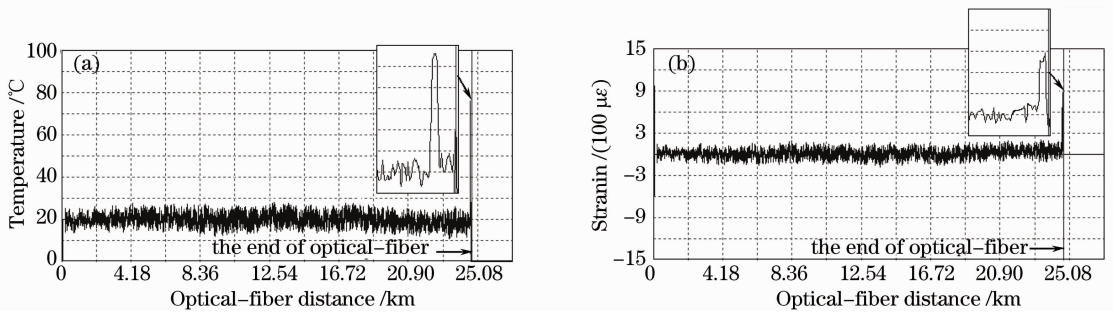


图 6 分析散射光的布里渊频移和幅度得到的(a)温度和(b)应变曲线

Fig. 6 Detected (a) temperature and (b) strain of the sensing fiber by analyzing the Brillouin frequency shift and amplitude of the scattering light

图 7(a)和图 7(c)给出了通过双参量传感测试得到的温度、应变与实际温度的对比曲线,累加平均次数为 16000 次。图 7(b)和图 7(d)中分别给出在相同情况下,通过单参量传感测试,即单独测试频移得到的温度、应变与实际温度、应变的对比曲线,可看出,采用检测布里渊光频移进行单参量传感时,温度分辨率约为 3 °C,应变分辨率约为 40 $\mu\epsilon$;而同时检测布里渊光频移和功率进行双参量传感时,温度分辨率约为 15 °C,应变分辨率约为 200 $\mu\epsilon$ 。双参量检测时性能变差

的原因就是前面所说的偏振相关性使得散射光功率(即光电检测信号的幅度)信息不能有效提取。

4 结 论

实现长距离双参量传感的布里渊光时域反射计,需要同时检测得到布里渊频移和幅度信号。相干检测布里渊光时域反射计存在偏振相关性和宽带幅度解调问题。采用正交偏振分集接收来抑制偏振相关性,并采用 Morlet 小波变换来进行幅度解调,

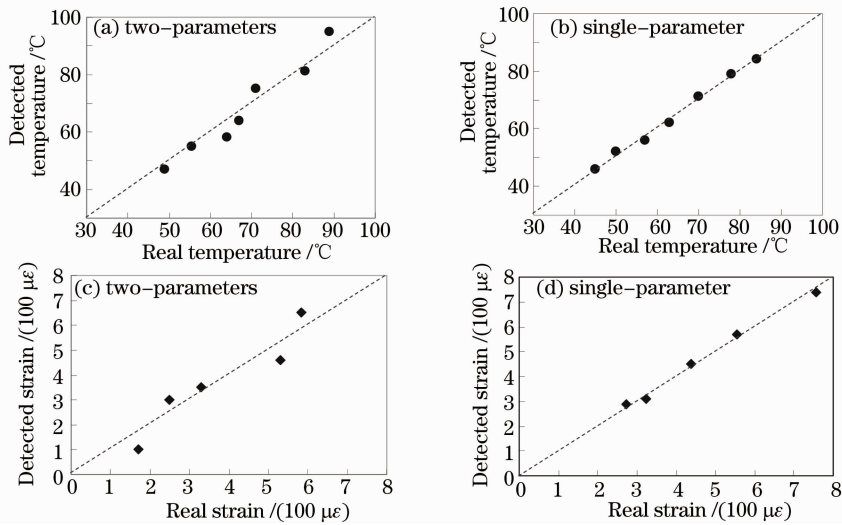


图 7 传感得到的温度、应变与实际温度、应变的对比

Fig. 7 Comparison between the detected temperature (/the detected strain) and the actual temperature (/the actual strain)

从而得到了频移和光功率的同时检测。实现了 25 km 光纤的分布式温度和应变的双参量传感。由于残余的信号偏振相关性和较微弱的自发布里渊散射光,传感器存在分辨率较低等缺陷。预计采用高速偏振控制器、增加累加平均时间和基于受激布里渊散射的 BOTDA,系统可得到更好的性能,这些将在后续的工作中进行探讨。

参 考 文 献

- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
肖浩,李芳,王永杰等.高分辨率光纤激光传感系统[J].中国激光,2008,**35**(1): 87~91
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐平,庞拂飞,陈娜等.基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J].中国激光,2008,**35**(12): 1955~1958
- Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1168~1171
刘建胜,李铮.光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J].光学学报,2003,**23**(10): 1168~1171
- Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 100~105
王伟,周邦全,张在宣等.分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J].光学学报,1999,**19**(1): 100~105
- Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127
杭利军,何存富,吴斌等.新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J].光学学报,2008,**28**(1): 123~127
- Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of rayleigh scattering light Φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power [J]. *Acta Optica*

Sinica, 2008, **28**(3): 569~572

- 谢孔利,饶云江,冉曾令.基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 Φ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J].光学学报,2008,**28**(3): 569~572
- X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
 - T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
 - Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
宋牟平.微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J].光学学报,2004,**24**(8): 1111~1114
 - H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Portland 2002, **1**: 309~312
 - T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno *et al.*. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques [C]. ECOC'98, Madrid, Spain, 1998. 149~150
 - Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Polarization-induced fading eliminated technique for coherent detection of Brillouin scattering spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1191~1194
刘迪仁,宋牟平,章献民等.布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术[J].光学学报,2005,**25**(9): 1191~1194
 - Song Muping, Zhao Bin. Study on the technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on hilbert transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1053~1056
宋牟平,赵斌.希尔伯特变换处理的布里渊散射 DOFS 的研究[J].光子学报,2005,**34**(9): 1328~1331
 - Song Muping, Ma Zhiqiang. Optical signal processing in Brillouin optical time domain reflector based morlet wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 819~823
宋牟平,马志刚.基于经典小波变换的布里渊光时域反射计光信号处理[J].光学学报,2007,**27**(5): 819~823